

NASKAH PUBLIKASI TUGAS AKHIR

**SIMULASI *CUP DRAWING* UNTUK MENGHINDARI
CACAT *WRINKLING* DAN *THINNING* DENGAN MENGGUNAKAN
*SOFTWARE AUTOFORM R2***



Naskah Publikasi Tugas Akhir ini disusun
untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh derajat sarjana S1
pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Surakarta

Disusun Oleh :
MUHAMMAD EFFENDI
D200100025

JURUSAN TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SURAKARTA
Januari 2016

HALAMAN PENGESAHAN
NASKAH PUBLIKASI TUGAS AKHIR

Naskah Publikasi yang berjudul "**Simulasi Cup Drawing Untuk Menghindari Cacat Wrinkling dan Thinning dengan Menggunakan Software AutoForm R2**", telah disetujui Pembimbing dan disahkan Ketua Jurusan sebagai syarat untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh derajat sarjana S1 pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surakarta.

Dipersiapkan oleh :

Nama : **Muhammad Effendi**

NIM : **D200100025**

Disetujui pada :

Hari : *Jumat*

Tanggal : *22-01-2016*

Pembimbing Utama



Agus Dwi Anggono, ST., M.Eng., Ph.D.

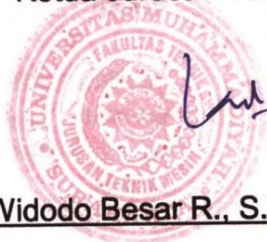
Pembimbing Pendamping



Bambang Waluyo F., ST, MT.

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Mesin



Tri Widodo Besar R., S.T., M.Sc., Ph.D.

SIMULASI CUP DRAWING UNTUK MENGHINDARI CACAT WRINKLING DAN THINNING DENGAN MENGGUNAKAN SOFTWARE AUTOFORM R2

Muhammad Effendi, Agus Dwi Anggono, Bambang Waluyo Febriantoko
Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Surakarta
Jl. A.Yani Tromol Pos I Pabelan, Kartasura
email : effendiowa@gmail.com

ABSTRAKSI

Simulasi dilakukan untuk mengurangi langkah trial and error sehingga dapat menghindari kesalahan produk dan dapat menekan biaya keseluruhan produksi. Tujuan dari simulasi ini adalah untuk mengetahui pengaruh dari variasi blank holder force dan koefisien gesek terhadap cacat wrinkling dan thinning pada proses cup drawing.

Simulasi dilakukan dengan menggunakan software AutoForm R2 dan tools yang digunakan mengikuti standar NumiSheet 2014 Benchmark 4 tentang wrinkling during cup drawing. Ada lima variasi blank holder force yang digunakan dalam simulasi ini 37N, 57N, 77N, 97N, dan 117N serta empat variasi koefisien gesek 0,05, 0,15, 0,25, dan 0,35. Material plat yang digunakan adalah plat aluminium dengan ketebalan 0,32 mm dan plat seng dengan ketebalan 0,30 mm.

Hasil analisa data simulasi baik pada material plat aluminium maupun plat seng mengalami penurunan nilai wrinkling saat terjadi kenaikan blank holder force dan koefisien gesek. Sedangkan thinning yang terjadi berbanding terbalik dengan hasil wrinkling, persentase thinning justru semakin tinggi seiring dengan naiknya blank holder force dan koefisien gesek. Analisa tes kegagalan material dengan forming limit diagram menunjukkan bahwa semua cup berada dalam kondisi aman dan bebas dari fracture.

Kata kunci : Simulasi, Cup Drawing, Wrinkling, Thinning

SIMULATION CUP DRAWING TO AVOID DEFECTS WRINKLING AND THINNING USING SOFTWARE AUTOFORM R2

Muhammad Effendi, Agus Dwi Anggono, Bambang Waluyo Febriantoko

Mechanical Engineering Muhammadiyah University of Surakarta

A.Yani Street Tromol Pos I Pabelan, Kartasura

email : effendiowa@gmail.com

ABSTRACTION

Simulations carried out to reduce the pace of trial and error so as to avoid the mistakes of products and can reduce the overall cost of production. The purpose of this simulation is to determine the effect of variations of blank holder force and coefficient of friction against wrinkling and thinning defects in the process of cup drawing.

Simulations carried out using software AutoForm R2 and tools that are used to follow the standards NumiSheet 2014 Benchmark 4 of wrinkling during cup drawing. There are five variations of blank holder force used in this simulation 37N, 57N, 77N, 97N and 117N and four variations of the coefficient of friction of 0.05, 0.15, 0.25, and 0.35. Plate material used is aluminum plate with a thickness of 0.32 mm and a zinc plate with a thickness of 0.30 mm.

Results analysis of simulation data either on an aluminum plate and zinc plate material is impaired wrinkling when there is an increase blank holder force and coefficient of friction. While thinning that occurs is inversely proportional to the results of wrinkling, thinning percentage even higher due to rising blank holder force and coefficient of friction. Analysis of test material failure with forming limit diagram shows that all the cups are in a safe condition and free from fracture.

Keywords: Simulation, Cup Drawing, Wrinkling, Thinning

PENDAHULUAN

Cup Drawing merupakan serangkaian proses plat yang dibentuk menyerupai mangkuk atau topi dengan cara *stamping metal* atau yang sering kita kenal dengan sebutan *deep drawing*.

Proses *deep drawing* merupakan salah satu proses *sheet metal forming* yang banyak digunakan pada industri manufaktur, terutama untuk menghasilkan komponen-komponen produk otomotif dan alat-alat rumah tangga, Pada proses *Cup Drawing*,

banyak dijumpai beberapa cacat pada proses pengerjaannya, yaitu patahan (*fracture*), kerutan (*wrinkle*), peregangan (*stretching*) dan perbedaan ketebalan (*thickness variation*).

Bentuk-bentuk cacat tersebut harus dicegah atau bahkan di hindari semaksimal mungkin agar dapat menekan biaya produksi. Pada umumnya untuk menghindari permasalahan tersebut, perusahaan manufaktur memerlukan langkah eksperimen *trial and error* yang

menelan biaya yang cukup besar. Maka dari itu simulasi di perlukan untuk menghindari terjadinya cacat pada proses *Cup Drawing*. Diantaranya yaitu untuk menghindari cacat kerutan (*wrinkling*) dan penipisan (*thinning*).

Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui pengaruh variasi *Blank Holder Force (BHF)* untuk meminimalisir cacat kerutan (*wrinkling*) dan penipisan (*thinning*).
2. Mengetahui pengaruh variasi koefisien gesek untuk meminimalisir cacat kerutan (*wrinkling*) dan penipisan (*thinning*).

Batasan Masalah

Agar tidak mengalami perluasan pembahasan, diberikan batasan-batasan penelitian sebagai berikut :

1. Analisis studi dilakukan dengan metode pengujian *Cup Drawing* dengan menggunakan *software AutoForm R2*
2. Simulasi dilakukan hanya untuk mengamati dan menganalisa cacat *wrinkling* dan *thinning* yang terjadi pada area kubah.
3. Variabel yang digunakan pada simulasi ini adalah sebagai berikut:
 - Variasi pada *Blank Holder Force* (37N, 57N, 77N, 97N, 117N).
 - Variasi koefisien gesek (0.05, 0.15, 0.25, 0.35).

Tinjauan Pustaka

Zheng dkk, 2003, Variabel BHF yang baik biasanya ditentukan dengan melakukan simulasi FEM atau eksperimen secara langsung. Untuk bagian geometri sederhana variabel BHF dapat diprediksi secara analitis. Namun sejauh ini, variabel BHF yang didapat dari prediksi analitis belum berkorelasi dengan baik dengan

eksperimen di lapangan. Metode yang efisien untuk memprediksi variabel Profil BHF adalah dengan menggunakan metode *cloosed-loop* yang dikontrol oleh simulasi FEM. *Wrinkling* dan *Fracture* adalah cacat yang umum ditemui pada proses *Deep Drawing*. Metode simulasi adaptif digunakan untuk menghilangkan atau mengurangi *Fracture* dan *Wrinkling* dengan menerapkan BHF di tingkat minimum. *Wrinkling* dipengaruhi oleh banyak faktor, seperti parameter proses, kondisi kontak, sifat mekanik, dan geometri dari blank. Berdasarkan pengamatan dari simulasi dan eksperimen pada proses *Cup Drawing* berbentuk kerucut, *Wrinkling* terbesar yang terjadi pada dinding samping *cup* terletak di 25% dari kedalaman *cup*.

Kliber dkk, 2000, mengatakan bahwa teknologi yang dikembangkan untuk keandalan pada operasi pembentukan (*sheet metal forming*) yakni Penjumlahan struktur untuk masalah karakteristik dengan deformasi yang besar. *Forming Limits Diagram (FLD)* dipakai dalam pratik industri untuk mengetahui kriteria kerusakan dalam proses produksi sebagai batas fungsi untuk kendala analisis. Kemungkinan terjadi kerusakan pada operasi proses *forming* pada gesekan antara bagian-bagian *die* dengan material (plat) atau gaya *blank holder*.

LANDASAN TEORI

Pengertian *Deep Drawing*

Menurut Rao, 2012, *deep drawing* adalah salah satu metode yang secara umum digunakan untuk proses pembentukan plat atau *sheet metal forming* dalam perindustrian agar dapat memproduksi secara massal komponen berbentuk cangkir (*cup*) dalam waktu yang singkat. Menurut Sharma, 2001, *deep drawing* adalah suatu proses pembentukan logam dari

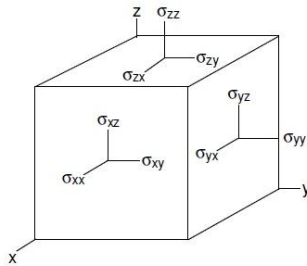
blank kedalam bentuk tabung (*shallow shape*).

Tegangan

Tegangan didefinisikan sebagai intensitas gaya F pada suatu titik di mana A adalah luasan terjadinya pembebanan. Jika besarnya tegangan sama disemua titik, maka :

$$\sigma = F/A$$

Ada sembilan komponen tegangan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1 tegangan normal adalah tegangan yang bekerja tegak lurus terhadap bidang pembebanan, bisa tarik atau tekan. Sedangkan tegangan geser adalah tegangan yang bekerja sejajar dengan bidang pembebanan.



Gambar 1. Sembilan komponen tegangan yang bekerja pada sebuah bidang.

Tegangan didefinisikan dengan dua subskrip. Pertama adalah gaya yang diberikan pada bidang pembebanan dan yang kedua adalah arah dari gaya tersebut. Misalnya, σ_{xx} adalah tegangan tarik yang bekerja pada arah sumbu x , dan tegangan geser yang bekerja pada bidang x pada arah sumbu y dinotasikan dengan σ_{xy} .

Regangan

Regangan menggambarkan besarnya deformasi yang terjadi pada sebuah bidang. Deformasi pada *engineering* atau *nominal strain* di definisikan oleh e :

$$e = (\ell - \ell_0) / \ell_0 = \Delta\ell / \ell_0$$

Untuk *true* atau *logarithmic strain* didefinisikan oleh ε :

$$\varepsilon = \ln(\ell / \ell_0) = \ln(1 + e)$$

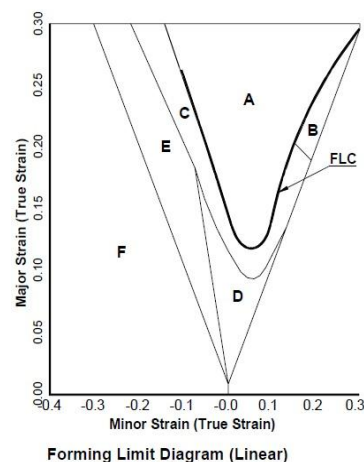
Kondisi Batas (*Boundary Condition*)

Dalam menganalisis masalah pada pembentukan logam, penting untuk dapat mengetahui kondisi batas. Seringkali hal ini tidak dinyatakan secara eksplisit. Beberapa diantaranya adalah sebagai berikut :

1. Tegangan normal (σ_z) pada permukaan bebas dan dua tegangan geser dipermukaan bidang adalah nol.
2. Tidak ada tegangan geser yang terjadi pada permukaan yang tanpa gesekan.
3. Regangan disuatu area sering dipengaruhi oleh deformasi dari area lain.
4. Prinsip *St-Venant* menyatakan bahwa batasan dari diskontinuitas akan hilang dalam satu karakteristik jarak diskontinuitas tersebut.

Forming Limit Diagram (FLD)

FLD (*Forming Limit Diagram*) atau bisa juga dikenal sebagai *Forming Limit Curve* adalah sebuah metode untuk menganalisa atau memprediksi karakteristik dari suatu material. Diagram ini memberikan gambaran grafis dari tes kegagalan suatu material.



Gambar 2. *Forming Limit Diagram*.

Gambar 2. adalah sebuah *Forming Limit Diagram* sebuah material yang

telah melalui proses *drawing*. Garis kurva FLC (*Forming Limit Curve*) adalah garis batas antara zona aman (*Safe Zone*) dan zona gagal (*Fail Zone*). Zona gagal adalah zona yang berada diatas FLC, pada zona tersebut terdapat satu daerah yang ditandai dengan huruf A, jika nilai regangan suatu material berada diatas kurva maka dapat dipastikan bahwa terjadi *splits* atau sobekan pada material.

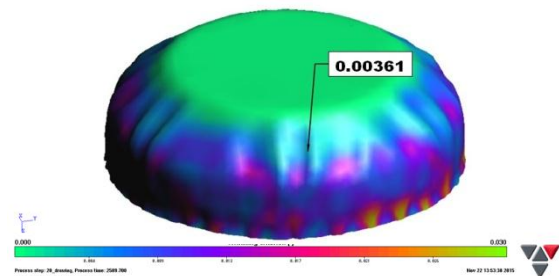
Zona aman adalah zona yang berada dibawah kurva, jika nilai regangan material berada dibawah kurva maka deformasi pada material tersebut bisa dikatakan aman. Pada Zona aman ini terdapat beberapa daerah yang dilambangkan dengan huruf B,C,D,E,F. Daerah B adalah *excess thinning area* atau terjadi penipisan material yang sangat besar pada daerah ini dan besar kemungkinan untuk terjadinya sobekan. Pada daerah C adalah *risk of splits area* atau rawan terjadi sobekan pada daerah ini, tetapi kemungkinannya masih lebih kecil dari daerah B. Daerah D adalah *safe area* atau daerah aman, pada daerah ini *wrinkling* dan *thinning* yang terjadi sangat kecil. Daerah E adalah *compressing area* dan daerah F adalah *thickening area*, kondisi material pada kedua daerah ini hampir mirip, karena terjadi penambahan ketebalan pada material, yang biasanya terjadi pada dinding *cup*, dan pada kedua daerah ini *wrinkling* yang terjadi besar tetapi *thinning* yang terjadi kecil.

Wrinkling Criterion (Kriteria Kerutan) dan Thinning (Penipisan)

Wrinkling (cacat kerut) adalah cacat yang umum yang terjadi dalam proses *sheet metal forming* yang dihasilkan dari tegangan tekan ke arah membran. Ada begitu banyak faktor yang mempengaruhi *wrinkling*, seperti ketebalan, bahan, gesekan, geometri

alat, BHF, *drawbeads*, dll., sangat sulit untuk memprediksi faktor mana yang mempengaruhi *wrinkling*. *Wrinkling criterion* merupakan salah satu variabel di *AutoForm* yang bertujuan untuk menilai kecenderungan kerutan dan membantu desainer untuk menghindari *wrinkling* selama tahap desain *die*.

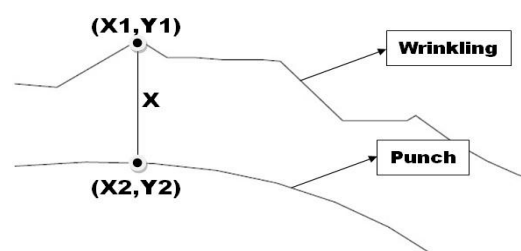
Di dalam *AutoForm* angka yang ditampilkan pada variabel *Wrinkling Criterion* bukanlah besarnya *wrinkling* yang terjadi.



Gambar 3. Analisa Wrinkling pada Autoform R2 (gambar diambil dari screen capture AutoForm).

Pada Gambar 3. nilai *wrinkling* menunjukkan angka 0.00361, angka yang ditampilkan pada variabel *Wrinkling Criterion* tersebut bukanlah besarnya *wrinkling* yang terjadi, melainkan hanya persentase terjadinya *wrinkling* pada area tersebut. Dalam prakteknya, *Wrinkling* sering terjadi di sudut-sudut tersebut dan itu sangat sulit untuk menghilangkannya karena *wrinkling* terletak pada permukaan produk.

Besarnya *Wrinkling* dapat dihitung dengan menggunakan metode seperti di Gambar 4.



Gambar 4. Metode menghitung *wrinkling*.

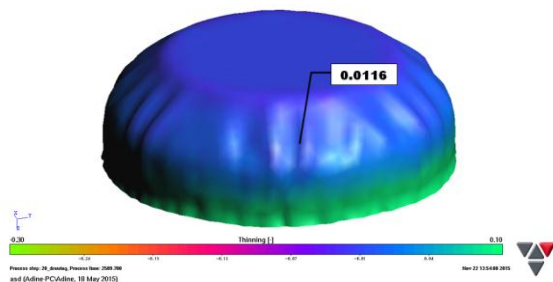
Besarnya *wrinkling* ditunjukkan dengan simbol x pada Gambar 4.,

sedangkan acuan yang digunakan adalah *punch*. Untuk menghitung nilai x dapat dilakukan dengan menggunakan rumus *pythagoras*.

$$x = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

Cacat *thinning* (penipisan) pada proses *deep drawing* tidak dapat dihindari, karena *thinning* terjadi akibat dorongan yang dilakukan oleh *punch*. Sehingga plat yang dijepit antara *blank holder* dan *dies* akan tertarik dan akan menimbulkan perbedaan ketebalan pada beberapa bagian.

Perlu diketahui bahwa besaran nilai *thinning* pada *AutoForm* adalah persentase ketebalan plat dari ketebalan asli.



Gambar 5. Analisa *thinning* pada simulasi (gambar diambil dari screen capture *AutoForm*).

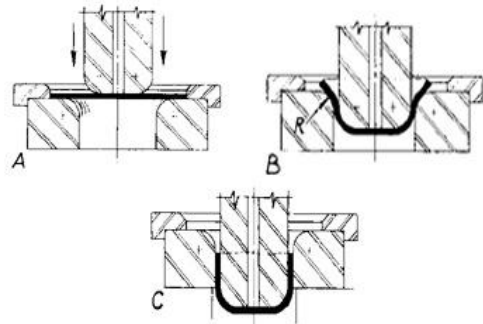
Di bagian yang ditandai pada Gambar 5. besarnya *thinning* menunjukkan nilai 0.0116, sama seperti pada variabel *wrinkling*, nilai yang ditampilkan tersebut bukanlah tebal plat setelah mengalami proses *drawing*, melainkan sebuah persentase penipisan plat dari ketebalan asli. Jadi artinya plat mengalami penipisan sebesar 0.00381% dari ketebalan asli.

Proses Deep Drawing

Proses *deep drawing* dilakukan dengan menekan material benda kerja yang berupa lembaran logam yang disebut dengan *blank* sehingga terjadi peregangan mengikuti bentuk *dies*, bentuk akhir ditentukan oleh *punch* sebagai penekan dan *die* sebagai

penahan benda kerja saat di tekan oleh *punch*.

Pada umumnya berbagai jenis material logam dalam bentuk lembaran dapat digunakan untuk proses *deep drawing* seperti *stainless steel*, aluminium, tembaga, perak, emas, baja maupun titanium. Gambaran lengkap proses *drawing* dapat dilihat pada gambar 6.



Gambar 6. Proses *deep drawing*

Berikut adalah macam-macam proses yang terjadi pada proses *deep drawing* :

a) Kontak Awal

Pada gambar 6. A, *punch* bergerak dari atas ke bawah, *blank* dipegang oleh *blank holder* agar tidak bergeser ke samping, kontak awal terjadi ketika bagian-bagian dari *die set* saling menyentuh *blank* saat kontak awal terjadi belum terjadi gaya-gaya dan gesekan dalam proses *drawing*.

b) Bending

Selanjutnya *blank* mengalami proses *bending* seperti pada gambar 6. B, *punch* terus menekan kebawah sehingga posisi *punch* lebih dalam melebihi jari-jari dari *die*, sedangkan posisi *die* tetap tidak bergerak ataupun berpindah tempat, kombinasi gaya tekan dari *punch* dan gaya penahan dari *die* menyebabkan material mengalami peregangan sepanjang jari-jari *die*, sedangkan daerah terluar dari *blank* mengalami kompresi arah radial.

c) Straightening

Saat *punch* sudah melewati radius *die*, gerakan *punch* ke bawah akan menghasilkan pelurusan sepanjang dinding *die* lihat gambar 6. C, blank akan mengalami peregangan sepanjang dinding *die*. Dari proses pelurusan sepanjang dinding *die* diharapkan mampu menghasilkan bentuk silinder sesuai dengan bentuk *die* dan *punch*.

d) Compression

Proses *compression* terjadi ketika *punch* bergerak ke bawah, akibatnya blank tertarik untuk mengikuti gerakan dari *punch*, daerah *blank* yang masih berada pada *blank holder* akan mengalami *compression* arah radial mengikuti bentuk dari *die*.

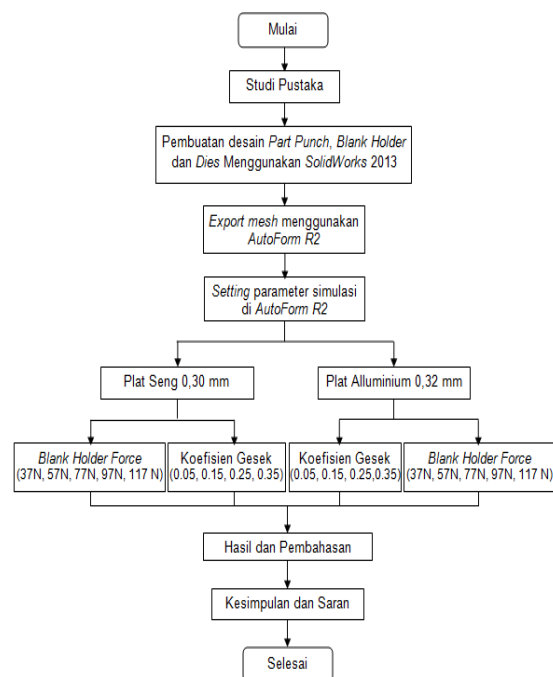
e) Tension

Tegangan tarik terbesar terjadi pada bagian bawah *cup* produk hasil *deep drawing*, bagian ini adalah bagian yang paling mudah mengalami cacat sobek, pembentukan bagian bawah *cup* merupakan proses terakhir pada proses *deep drawing*.

Jarak Celah (*Clearance*) Pada *Deep Drawing*

Donaldson, 1986, Jarak celah yang harus diperhatikan pada *deep drawing* yaitu jarak celah antara *punch* dan *die*. Jarak celah antara *punch* dan *die* yang terlalu banyak akan mengakibatkan kontak plat dengan *punch* dan *die* tidak merata. proses pengepresan akan berubah menjadi pelebaran karena ketidaksesuaian celah. Sebaiknya bila celah terlalu sempit, maka proses akan menjadi *ironing*. Idealnya *clearance* antara *punch* dan *die* harus sama dengan tebal plat. *Clearance* yang dianjurkan antara 7% sampai dengan 20% dari tebal plat.

METODE PENELITIAN



Gambar 7. Diagram alir penelitian

Studi Pustaka

Studi pustaka yaitu mencari mengenai penelitian yang serupa berupa jurnal-jurnal penelitian maupun teori yang menyangkut penelitian tersebut, sehingga akan memiliki perbedaan variabel dari penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya.

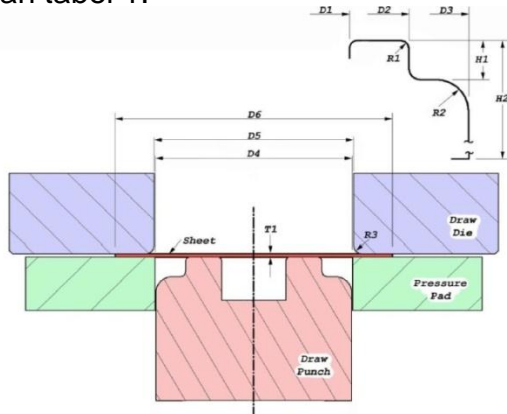
Pembuatan Desain

Pembuatan desain dilakukan menggunakan komputer dengan spesifikasi sebagai berikut :

- Processor : Intel(R) Core(TM) i3 CPU M380 @2.53GHz
- Memory : 4.00 GB (3.86 GB usable)
- VGA : AMD Radeon HD 6470M
- OS : Windows 7 Ultimate 64-bit

Karena pembuatan model desain tidak bisa dilakukan di software *Autoform R2*, maka desain *blank*, *punch*, *blank holder*, dan *die* dibuat menggunakan software *SolidWorks 2013* dengan format file **.igs* untuk mempermudah tahap *export mesh* di

Autoform R2. Dimensi ukuran dari model part mengacu pada standar *Benchmark 4* untuk *Wrinkling During Cup Drawing*. Dimensi part untuk *drawing* dapat dilihat pada gambar 8. dan tabel 1.



Gambar 8. Pandangan skematik alat dan dimensi untuk proses *drawing*. (Numisheet, 2014).

Tabel 1. Dimensi alat untuk proses *drawing* dalam milimeter (a) dan dalam inchi (b)

(a)												
Parameter	D1	D2	D3	D4	D5	D6	R1	R2	R3	T1	H1	H2
Condition A	15.24	31.8	45.72	45.72	46.74	64.77	1.016	3.810	1.905	t	5.207	34.3
Condition B	15.24	31.8	45.72	45.72	46.74	64.77	1.016	3.810	1.905	t	3.429	34.3

(b)												
Parameter	D1	D2	D3	D4	D5	D6	R1	R2	R3	T1	H1	H2
Condition A	0.600	1.250	1.800	1.800	1.840	2.550	0.040	0.150	0.075	t	0.205	1.350
Condition B	0.600	1.250	1.800	1.800	1.840	2.550	0.040	0.150	0.075	t	0.135	1.350

Desain model *die set* yang awalnya berbentuk solid dirubah menjadi bentuk *surface* agar lebih memudahkan dalam proses *meshing* pada software *Autoform R2*.

Export Mesh

Export mesh adalah proses *convert* desain geometri *blank* dan *tools* yang telah dibuat di *SolidWorks 2015* yang berformat **.igs* menjadi bentuk mesh dengan format **.af*.

Setting Parameter Simulasi

Tahapan *setting* parameter simulasi dari awal sampai menjadi model simulasi adalah sebagai berikut:

1. New file

Pengaturan yang diberikan pada tahapan ini diantaranya adalah :

- Mengatur unit satuan, untuk unit satuan panjang dalam *AutoForm R2* ada tiga pilihan yaitu milimeter (mm), meter (m) dan inchi (inch). Sedangkan untuk unit satuan gaya (force) menggunakan newton (N) dan pounds (lbs).
- Meshing parameters*, untuk mengatur toleransi kesalahan dan kerapatan *mesh* pada *blank*.

2. Process generator

Process generator adalah tahapan untuk mengatur gerakan tools pada simulasi *drawing*. Dalam tahapan ini ada beberapa pengaturan, yaitu:

- Simulation type*, tahapan ini untuk menentukan jenis simulasi yang akan digunakan, apakah secara bertahap (*Incremental*) atau satu langkah (*OneStep*) dan arah gravitasi, ada tiga pilihan dalam menentukan arah gravitasi, yaitu keatas (*upwards*), kebawah (*downwards*) atau tanpa gravitasi (*none*).
- Blank*, pada tahap ini kita perlu meng-*import* desain geometri *blank* yang sudah melalui proses *export mesh* dengan format file **.af*, lalu menentukan jenis material yang akan digunakan, ketebalannya dan juga posisi dari *blank*.
- Tools*, sama seperti pada pengaturan *blank*, pada *tools* kita juga meng-*import* desain geometri *tools* yang akan digunakan, diantaranya adalah *die*, *blank holder*, *punch*, bisa juga menambahkan *tool-tool* lain jika memang diperlukan.
- Lube*, pada tahapan ini untuk mengatur jenis pelumasan yang akan digunakan. Jenis-jenis pelumasan pada *AutoForm* yaitu, *special lubrication*, *standard*, *clean*, dan *user defined*. Yang membedakan dari keempat jenis pelumasan tersebut adalah besarnya koefisien geseknya.

- e. *Process*, pada tahapan ini digunakan untuk mengatur gerakan dari tools pada saat proses *gravity*, *closing*, dan *drawing*. Untuk ketiga pengaturan tersebut ada empat pilihan, diantaranya adalah *tools* dalam keadaan tidak aktif (*non-active*), *tools* dalam keadaan diam (*stationary*), *tools* dalam keadaan bergerak dengan memasukkan kecepatan yang dikehendaki (*displacement*), besarnya gaya yang diberikan oleh *tools* (*force*).

Variasi yang Digunakan

Pada simulasi ini menggunakan dua jenis material plat yang berbeda dengan ketebalan yang berbeda pula, yaitu plat seng dengan ketebalan 0,30 mm dan plat aluminium dengan ketebalan 0,32 mm. Variasi koefisien gesek dan *blank holder force* diterapkan pada masing-masing jenis material plat dengan menggunakan lima variasi *blank holder force* (37N, 57N, 77N, 97N, 117N) dan empat variasi koefisien gesek (0.05, 0.15, 0.25, 0.35).

Hasil dan Pembahasan

Hasil yang dianalisa pada penelitian ini adalah hasil *wrinkling* dan *thinning* yang terjadi pada *cup* setelah dilakukan proses *drawing* dengan variasi yang digunakan dan difokuskan pada area kubah dari *cup*. Analisa dilakukan untuk mengetahui apakah variasi yang digunakan dapat mengurangi cacat yang terjadi pada *cup*. Untuk *formability* dari masing-masing material juga akan dianalisis dengan *Forming Limit Diagram* (FLD).

Kesimpulan dan Saran

Setelah selesai melakukan simulasi dan analisis data kemudian dilakukan penarikan kesimpulan serta saran dari hasil dan pembahasan simulasi yang telah didapatkan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

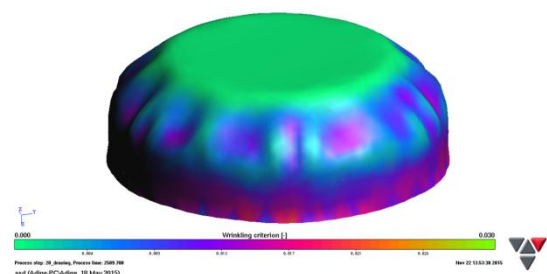
Hasil Simulasi

Simulasi dilakukan dengan memvariasikan lima nilai *Blank Holder Force* (BHF) dan empat koefisien gesek. Material plat yang digunakan adalah plat aluminium dengan ketebalan 0,32 mm dan plat seng dengan ketebalan 0,30 mm.

a. Jenis material yang digunakan

Pemilihan jenis material plat yaitu plat seng dengan ketebalan 0,3 mm dan plat aluminium dengan ketebalan 0,32 mm dikarenakan kemudahannya untuk mencari jenis plat dan ketebalannya di pasaran. Pemilihan jenis material *blank* yang berbeda karena diharapkan hasil yang didapatkan menunjukkan perbedaan yang jelas. Plat seng dengan modulus elastisitas sebesar $108 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ dan modulus elastisitas plat aluminium sebesar $70 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, dengan perbedaan nilai modulus elastisitas yang besar diharapkan bentuk dari *cup* juga menunjukkan perbedaan yang jelas. Dan juga semakin memperjelas perbedaan kedua material plat tersebut jika digunakan pada proses *cup drawing*.

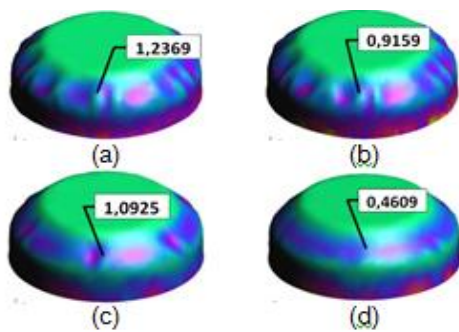
b. Analisa Wrinkling



Gambar 9. *Wrinkling criterion* pada AutoForm R2.

Wrinkling criterion yang ditunjukkan pada gambar 9. adalah salah satu variabel dalam AutoForm R2 yang digunakan untuk menganalisa *wrinkling* yang terjadi pada *cup*.

- Hubungan *wrinkling* dengan BHF.

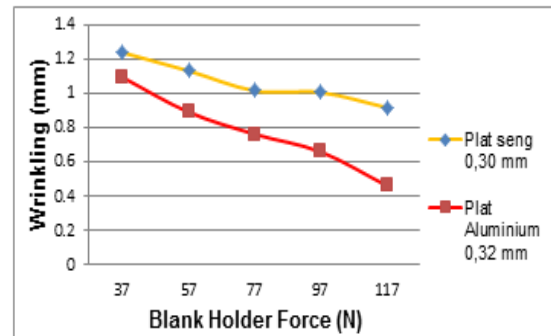


Gambar 10. Analisa *wrinkling* pada *cup* hasil simulasi material plat seng 0,30 mm (a) dan plat aluminium 0,32 mm (b), dengan memvariasikan BHF.

Gambar 10.(a) dan 10.(b) adalah plat seng ketebalan 0,30 mm dengan masing-masing BHF sebesar 37N dan 117N. Sedangkan gambar 10.(c) dan 10.(d) adalah plat aluminium ketebalan 0,32 mm dengan masing-masing BHF sebesar 37N dan 117N dan koefisien gesek sebesar 0,15.

Pada gambar 10.(a) dan 10.(b) secara visual *wrinkling* yang terjadi tidak begitu terlihat, hal ini terjadi karena *die clearance* yang besar jika menggunakan material dengan ketebalan 0,30 mm, sehingga dari segi visual *wrinkling* yang terjadi tidak terlihat berkurang walaupun BHF dinaikkan, tetapi dari pengukuran *wrinkling* yang didapat dari perhitungan empat titik *wrinkling* yang berbeda pada *cup*, nilai *wrinkling* menunjukkan penurunan. Pada variasi BHF 37N *wrinkling* tertinggi adalah 1,2369 mm sedangkan pada saat BHF dinaikkan sebesar 117N *wrinkling* pada titik yang sama menurun menjadi 0,9159 mm. Lain halnya dengan plat aluminium yang memiliki ketebalan 0,32 mm, secara visual *wrinkling* terlihat berkurang karena kenaikan nilai BHF, seperti yang ditunjukkan pada gambar 10.(c) dan 10.(d), titik-titik *wrinkling* yang terlihat pada gambar 10.(c) mulai berkurang saat terjadi kenaikan nilai BHF seperti yang terlihat pada gambar 10.(d). Pada variasi BHF 37N *wrinkling*

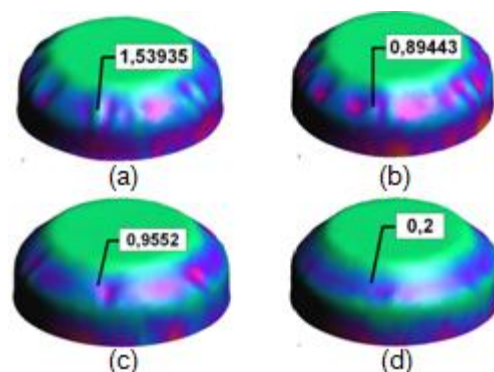
tertinggi adalah 1,0925 mm sedangkan pada saat BHF dinaikkan sebesar 117N *wrinkling* pada titik yang sama menurun menjadi 0,4609 mm. Hal ini disebabkan karena *die clearance* yang tidak terlalu besar jika menggunakan material dengan ketebalan 0,32 mm.



Gambar 11. Grafik hubungan antara *Blank Holder Force* dan *Wrinkling* pada material plat seng ketebalan 0,30 mm dan plat aluminium ketebalan 0,32 mm.

Grafik yang ditunjukkan pada gambar 11. membuktikan bahwa menaikkan nilai BHF dapat mengurangi *wrinkling* yang terjadi pada *cup*. Grafik menunjukkan tren penurunan nilai *wrinkling*, tetapi jika variabel BHF terlalu besar akan menyebabkan sobekan (*fracture*) karena *blank holder* menjepit *blank* terlalu kuat sehingga tidak terjadi aliran material dan *blank* akan sobek.

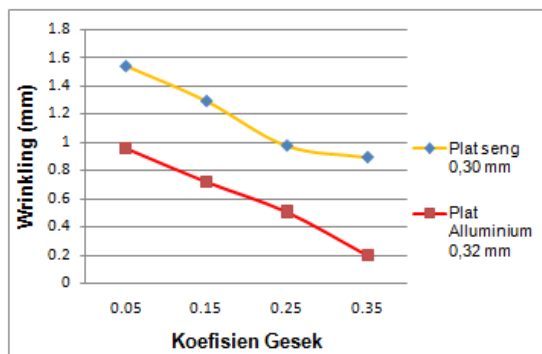
- Hubungan *wrinkling* dengan koefisien gesek.



Gambar 12. Analisa *wrinkling* pada *cup* hasil simulasi material plat seng 0,30 mm (a,b) dan plat aluminium 0,32 mm (c,d) dengan memvariasikan koefisien gesek.

Gambar 12.(a) dan 12.(b) adalah plat seng ketebalan 0,30 mm dengan masing-masing koefisien gesek sebesar 0,05 dan 0,35. Sedangkan gambar 12.(c) dan 12.(d) adalah plat aluminium ketebalan 0,32 mm dengan masing-masing koefisien gesek sebesar 0,05 dan 0,35. BHF pada kedua material adalah konstan dengan nilai BHF sebesar 37N.

Pada material plat seng *wrinkling* yang terjadi berkurang dengan signifikan seperti yang terlihat pada gambar 12.(a) dan 12.(b) titik *wrinkling* tertinggi pada saat koefisien gesek 0,05 adalah 1,53935 mm berkurang menjadi 0,89443 mm pada saat koefisien gesek dinaikkan menjadi 0,35. Pada material plat aluminium *wrinkling* juga berkurang secara signifikan, seperti yang ditunjukkan pada gambar 12.(c) dan 12.(d), titik *wrinkling* tertinggi dengan koefisien gesek 0,05 adalah sebesar 0,9552 mm turun menjadi 0,2 mm pada titik yang sama saat koefisien gesek dinaikkan menjadi 0,35 mm.

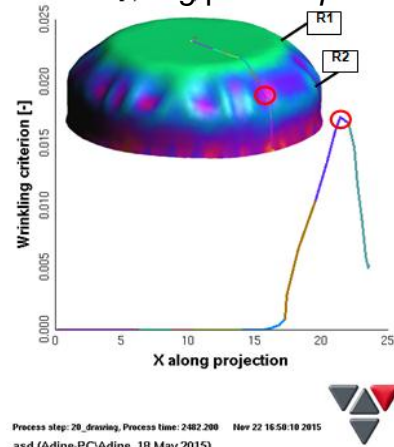


Gambar 13. Grafik hubungan antara koefisien gesek dan *Wrinkling* pada material plat seng ketebalan 0,30 mm dan plat aluminium ketebalan 0,32 mm.

Grafik yang ditunjukkan pada gambar 13. menunjukkan bahwa terjadi tren penurunan nilai *wrinkling* pada kedua material karena koefisien gesek yang semakin besar. Sama halnya seperti penurunan nilai *wrinkling* dengan menaikkan nilai BHF, semakin besar nilai koefisien gesek

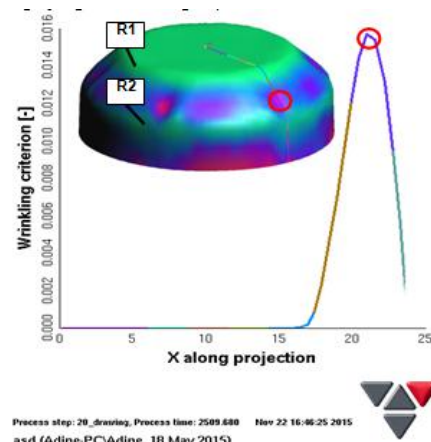
maka kemungkinan *cup* mengalami *fracture* juga akan semakin besar.

- Distribusi *wrinkling* pada *cup*



Gambar 14. Distribusi *wrinkling* pada plat seng 0,30 mm dengan BHF sebesar 37N dan koefisien gesek 0,15.

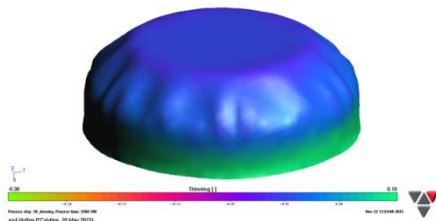
Gambar 14. menunjukkan distribusi *wrinkling* pada *cup* dengan material plat seng 0,30 mm dengan BHF 37N dan koefisien gesek 0,15. Pada gambar 14. terlihat bahwa bagian atas tidak mengalami *wrinkling* sampai pada area R1 dari *cup*, setelah melewati R1 atau pada area kubah nilai *wrinkling* naik secara signifikan, titik *wrinkling* tertinggi terjadi pada area kubah dan berada tepat diatas R2 dari *cup* atau dibagian yang dilingkari. Setelah mencapai titik tertinggi selanjutnya nilai *wrinkling* terus turun sampai titik paling ujung dari dinding *cup*.



Gambar 15. Distribusi *wrinkling* pada plat aluminium 0,32 mm dengan BHF sebesar 37N dan koefisien gesek 0,15.

Gambar 15. menunjukkan distribusi *wrinkling* pada *cup* dengan material plat aluminium 0,32 mm dengan BHF 37N dan koefisien gesek 0,15. Pada gambar 15. sama seperti pada plat seng terlihat bahwa bagian atas tidak mengalami *wrinkling* sampai pada area R1 dari *cup*, setelah melewati R1 atau pada area kubah nilai *wrinkling* tertinggi tercapai pada area kubah tepatnya pada bagian yang dilingkari. Setelah mencapai titik tertinggi *wrinkling* terus turus sampai pada titik paling ujung dari dinding *cup*.

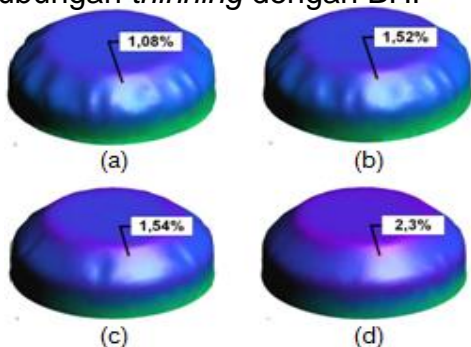
c. Analisa *Thinning*



Gambar 16. *Thinning* pada Autoform R2

Thinning yang ditunjukkan pada gambar 16. adalah salah satu variabel dalam AutoForm R2 yang digunakan untuk menganalisa seberapa besar penipisan yang terjadi pada *cup* dalam bentuk presentase besarnya penipisan. Jika persentase penipisan pada suatu area menunjukkan nilai minus maka pada area tersebut terjadi penipisan sedangkan jika menunjukkan nilai positif maka pada area tersebut terjadi penebalan.

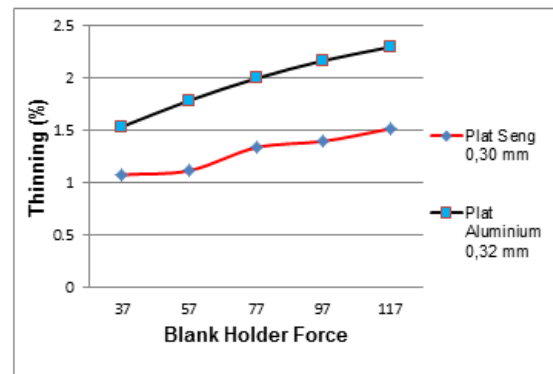
- Hubungan *thinning* dengan BHF



Gambar 17. Analisa *thinning* pada *cup* hasil simulasi material plat seng 0,30 mm (a,b) dan plat aluminium 0,32 mm (c,d), dengan memvariasikan BHF.

Gambar 17.(a) dan 17.(b) adalah plat seng ketebalan 0,30 mm dengan masing-masing BHF sebesar 37N dan 117N. Sedangkan gambar 17.(c) dan 17.(d) adalah plat aluminium ketebalan 0,32 mm dengan masing-masing BHF sebesar 37N dan 117N dan koefisien gesek sebesar 0,15.

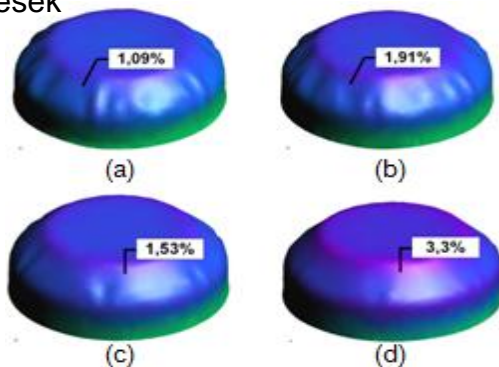
Cacat *thinning* atau penipisan pada proses *cup drawing* merupakan salah satu cacat yang tidak mungkin untuk dihindari, penipisan pasti terjadi karena *blank* mengalami regangan akibat gaya dorongan yang diberikan oleh *punch*.



Gambar 18. Grafik hubungan antara *blank holder force* dan *thinning* pada material plat seng ketebalan 0,30 mm dan plat aluminium ketebalan 0,32 mm.

Grafik yang ditunjukkan pada gambar 18. menunjukkan bahwa penipisan akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya nilai BHF. Nilai BHF yang semakin besar akan menyebabkan *cup* mengalami *fracture* karena regangan telah melewati titik luluh dari material tersebut. Secara visual peningkatan persentase penipisan pada *cup* pada kedua material memang tidak terlalu terlihat karena penipisan pada interval nilai BHF dari 37-117N sangat kecil, hanya bekisar antara 1,08-2,3%.

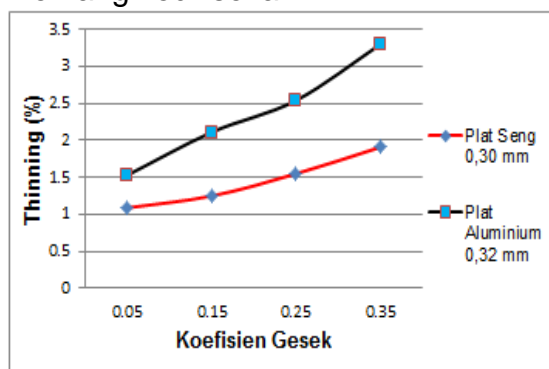
- Hubungan *thinning* dengan koefisien gesek



Gambar 19. Analisa *thinning* pada cup hasil simulasi material plat seng 0,30 mm (a,b) dan plat aluminium 0,32 mm (c,d), dengan memvariasikan koefisien gesek.

Gambar 19.(a) dan 19.(b) adalah plat seng ketebalan 0,30 mm dengan masing-masing koefisien gesek sebesar 0,05 dan 0,35. Sedangkan gambar 19.(c) dan 19.(d) adalah plat aluminium ketebalan 0,32 mm dengan masing-masing koefisien gesek sebesar 0,05 dan 0,35. BHF pada kedua material adalah konstan dengan nilai BHF sebesar 37N.

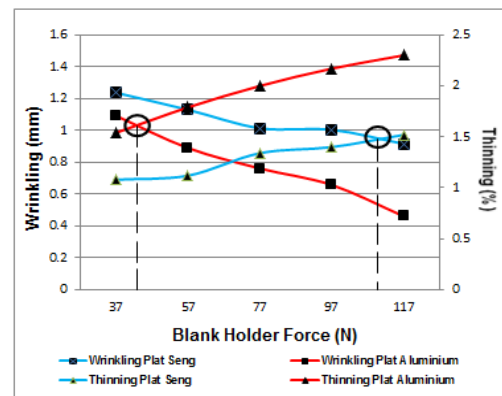
Penipisan pada material plat seng dengan memvariasikan koefisien gesek tidak begitu terlihat, sama seperti penipisan pada material plat seng dengan memvariasikan BHF karena nilai persentase penipisannya memang kecil sekali.



Gambar 20. Grafik hubungan antara koefisien gesek dan *thinning* pada material plat seng ketebalan 0,30 mm dan plat aluminium ketebalan 0,32 mm.

Grafik yang ditunjukkan pada gambar 20. menunjukkan bahwa kenaikan persentase penipisan pada material plat seng tidak terlalu signifikan, pada nilai koefisien tertinggi pun persentase penipisan hanya sebesar 1,91% dan cup masih dalam kondisi aman, tidak terjadi *fracture*. Tetapi pada material plat aluminium saat nilai koefisien gesek berada pada nilai tertinggi, persentase penipisan lumayan tinggi, yaitu sebesar 3,3%.

- d. Hubungan *thinning* dan *wrinkling* dengan variasi BHF



Gambar 21. Grafik perbandingan antara *wrinkling* dan *thinning* dengan variasi BHF.

Grafik yang ditunjukkan pada gambar 21. menunjukkan garis perpotongan antara *wrinkling* dan *thinning* dengan variasi BHF. Dari hasil perpotongan tersebut didapatkan komposisi terbaik untuk mendapatkan hasil yang bagus tetapi tidak terlalu besar nilai cacat *wrinkling* dan *thinning*nya. Untuk plat seng hasil dari perpotongannya didapatkan BHF sebesar 111N, dengan BHF sebesar itu *wrinkling* yang dihasilkan sebesar 0,96 mm dan *thinning* yang dihasilkan sebesar 1,65%. Sedangkan untuk plat aluminium dari perpotongan grafik diatas didapatkan BHF sebesar 42N, dan dengan BHF sebesar 42N *wrinkling* yang terjadi sebesar

1,06 mm dan persentase penipisan sebesar 1,5%.

- e. Perbandingan hasil simulasi dengan perbedaan material *blank*

Pada cup hasil simulasi perbedaan *wrinkling* dan *thinning* terlihat dengan jelas. Pada plat seng *wrinkling* yang terjadi lebih besar dibandingkan dengan plat aluminium, hal ini disebabkan karena nilai modulus elastisitas seng yang besar, yaitu sebesar $108 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ cukup banyak selisihnya dengan modulus elastisitas plat aluminium yang hanya sebesar $70 \times 10^9 \text{ N/m}^2$. Nilai modulus elastisitas suatu material berpengaruh terhadap *formability* material tersebut disebabkan karena modulus elastisitas merupakan perbandingan antara tegangan dan regangan aksial dalam deformasi yang elastis, sehingga modulus elastisitas menunjukkan kecenderungan suatu material untuk berubah bentuk dan kembali lagi ke bentuk semula bila diberi beban.

Modulus elastisitas merupakan ukuran kekakuan suatu material, sehingga semakin tinggi nilai modulus elastisitas bahan, maka semakin sedikit perubahan bentuk yang terjadi apabila diberi gaya. Jadi, semakin besar nilai modulus ini maka semakin kecil regangan elastis yang terjadi atau semakin kaku. Hal tersebut sejalan dengan hasil simulasi, plat aluminium menghasilkan *wrinkling* yang rendah karena modulus elastisitasnya rendah, sedangkan plat seng yang memiliki modulus elastisitas yang lebih besar menghasilkan *wrinkling* yang besar pula, karena bahan menjadi semakin kaku seiring dengan semakin besarnya modulus elastisitas bahan tersebut.

Untuk cacat *thinning* yang terjadi pada plat aluminium lebih besar jika dibandingkan dengan plat seng. Regangan berbanding lurus dengan tegangan, sedangkan regangan berbanding terbalik terhadap keelastisitasnya. Hal ini yang menyebabkan mengapa penipisan pada plat aluminium menjadi besar, karena regangan yang dihasilkan pada plat aluminium juga besar, sehingga plat aluminium memiliki aliran material yang lebih bagus dibandingkan dengan plat seng. Jadi dapat ditarik kesimpulan bahwa semakin kecil nilai modulus elastisitasnya maka semakin mudah bagi bahan untuk mengalami perpanjangan atau pemampatan, hal itu lah yang menyebabkan mengapa penipisan pada plat aluminium lebih besar jika dibandingkan dengan plat seng.

Hasil Eksperimen

Gambar berikut merupakan hasil eksperimen sebelumnya yang dilakukan oleh saudara Agung Trianto pada tahun 2015. Bagian ini ditampilkan lagi untuk keperluan validasi hasil penelitian dengan metode simulasi. Pada percobaan eksperimen hanya menggunakan tiga variasi BHF (37, 47, 57N) dan dua variasi koefisien gesek (0,05 dan 0,15). Penambahan variasi nilai BHF dan koefisien gesek pada simulasi ini bertujuan untuk mengetahui apakah penambahan pada variasi nilai BHF dan koefisien gesek dapat berpengaruh pada *cup* atau tidak hal ini juga sejalan dengan tujuan dari simulasi ini yaitu untuk mencari solusi mengurangi cacat *wrinkling* dan *thinning* yang terjadi pada proses *cup drawing*.



Gambar 22. *Cup* hasil eksperimen material plat seng 0,30 mm (a,b), dan plat aluminium 0,32 mm (c,d).

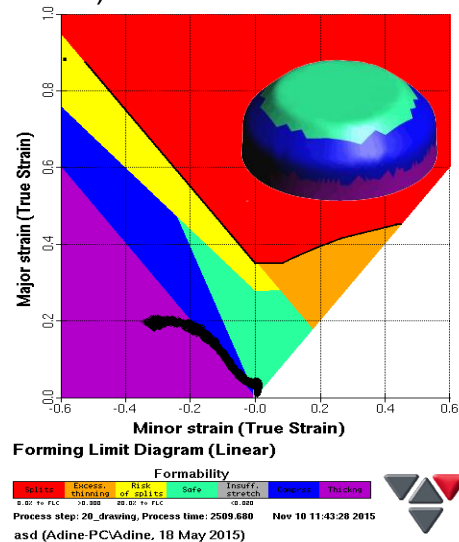
Gambar 22.(a) dan 22.(b) adalah *cup* material plat seng dengan ketebalan 0,30 mm dengan nilai BHF masing-masing sebesar 37N dan 57N. Gambar 22.(c) dan 22.(d) adalah *cup* material plat aluminium dengan ketebalan 0,32 mm dengan nilai BHF masing-masing sebesar 37N dan 57N. Besarnya nilai koefisien gesek *cup* pada gambar 22. adalah 0,05. Tampak dari gambar 22. tersebut bahwa hasil simulasi pada kedua material plat dengan kondisi nilai BHF dan koefisien gesek yang sama lebih baik dari hasil eksperimen karena *blank holder* telah menjepit *blank* dengan tepat sehingga cacat *wrinkling* pada bagian kubah *cup* dapat diminimalisir. Nilai *wrinkling* yang ditunjukkan pun lebih besar pada hasil eksperimen dibandingkan dengan hasil simulasi. Dengan kondisi nilai BHF dan koefisien gesek yang sama seperti yang dideskripsikan sebelumnya pada eksperimen nilai *wrinkling* pada material plat seng 0,30 mm dan plat aluminium 0,32 mm adalah sebesar 1 mm dan 0,98 mm sedangkan pada simulasi nilai *wrinkling*-nya adalah 0,9 mm dan 0,86 mm. Hasil simulasi menunjukkan hasil yang lebih baik daripada hasil eksperimen.

Penipisan yang terjadi pada hasil eksperimen juga lebih besar dibandingkan dengan hasil simulasi. Rata-rata penipisan material plat aluminium pada hasil eksperimen

sebesar 9,3% sedangkan pada simulasi hanya sebesar 3,3%.

Analisa Hasil Simulasi Dengan *Forming Limit Diagram* (FLD)

Analisa FLD (*Forming Limit Diagram*) dilakukan untuk menganalisa atau memprediksi karakteristik dari suatu material. Diagram ini memberikan gambaran grafis dari tes kegagalan suatu material. FLD yang dihasilkan dari kedua material dengan berbagai variasi BHF dan koefisien gesek hampir sama. Semua *cup* berada dibawah *Forming Limit Curve* (FLC) sehingga aman dari *fracture* (sobekan).



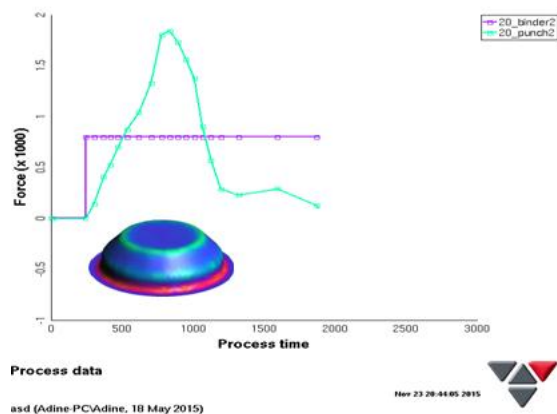
Gambar 23. FLD untuk material plat aluminium 0,32 mm dengan variasi BHF sebesar 37N dan koefisien gesek 0,15.

FLD yang ditampilkan pada gambar 23. menunjukkan kondisi dari *cup* setelah mengalami proses *drawing*. *Cup* berada pada zona dibawah *Forming Limit Curve* (FLC) atau artinya *cup* berada pada kondisi aman. Bagian atas *cup* berada pada *safe zone* yang berarti bahwa pada bagian ini *wrinkling* dan *thinning* yang terjadi sangat kecil, sedangkan daerah kubah pada *cup* berada di zona *compressing* yang berarti bahwa *wrinkling* dan *thinning* di area ini cukup besar, lalu pada bagian dinding *cup* berada pada zona *thickening* atau

penebalan, *wrinkling* pada zona ini paling besar dibandingkan zona lainnya tetapi tidak terjadi *thinning* pada zona ini karena dinding *cup* mengalami penebalan.

Data Proses

Data proses ini digunakan untuk mengetahui grafik aliran kekuatan dari *tools* yang digunakan pada proses *drawing*.



Gambar 24. Grafik proses data dari *cup* material plat aluminium dengan BHF sebesar 37N dan koefisien gesek 0,15.

Gambar 24. menunjukkan grafik aliran kekuatan dari *tools* yang digunakan pada proses *drawing* pada material plat aluminium 0,32 mm dengan BHF sebesar 37N dan koefisien gesek 0,15. Gambar 23. menunjukkan bahwa *punch force* mulai menunjukkan tren kenaikan setelah *punch* mulai memberikan tekanan pada *blank* begitu juga pada *blank holder*. Tetapi pada *blank holder*, *force* tertinggi langsung tercapai pada saat *punch* mulai menekan *blank* dan bertahan sampai akhir proses *drawing*, sedangkan pada *punch force* tertinggi baru tercapai saat *cup* berada dalam bentuk seperti yang terlihat pada gambar 24. dan perlahan mulai turun sampai mencapai nilai minus karena *cup* sudah terbentuk dan hanya tinggal mendorong *cup* keluar dari *die* saja. Untuk material lain dengan beberapa variasi yang diterapkan menunjukkan

grafik proses data yang hampir sama, yang membedakan hanya besarnya nilai tertinggi dari *punch force* dan pada waktu beberapa nilai tertinggi *punch force* tersebut tercapai.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Setelah melakukan analisis data hasil simulasi maka dapat ditarik beberapa kesimpulan :

1. Variasi pada *Blank Holder Force* (BHF) untuk mengurangi cacat *wrinkling* (kerutan) pada kedua material bisa dikatakan berhasil, dengan menaikkan BHF *wrinkling* yang terjadi pada *cup* dapat diminimalisir dengan baik. Pada cacat *thinning* (penipisan), semakin tinggi nilai BHF maka akan semakin besar pula persentase penipisan pada *cup*.
2. Variasi pada koefisien gesek untuk mengurangi cacat *wrinkling* juga bisa dikatakan berhasil untuk mengurangi cacat *wrinkling* pada kedua material plat yang digunakan. Tetapi untuk cacat *thinning* sama seperti pada variasi BHF, persentase penipisan justru semakin besar seiring dengan naiknya nilai koefisien gesek.

Saran

1. *Die clearance* yang besar mengakibatkan nilai cacat *wrinkling* yang besar pula, dengan merujuk pada hasil simulasi yang telah dilakukan disarankan untuk menggunakan koefisien gesek yang besar untuk mengurangi cacat *wrinkling* yang disebabkan karena *die clearance* yang besar.
2. Kualitas permesinan dari *tools* yang digunakan pada eksperimen terutama pada permukaan yang menjepit *blank* disarankan untuk benar-benar halus, sehingga perbedaan data dari hasil simulasi dan eksperimen tidak terlalu jauh.

3. Untuk desain *die set* pada eksperimen disarankan untuk menggunakan *coil spring* agar distribusi kekuatan dari *blank holder* lebih merata.
4. Perlu ketekunan dan ketelitian yang tinggi dalam mengambil dan menganalisa data, baik data hasil simulasi maupun data hasil eksperimen.

DAFTAR PUSTAKA

- B.V.S.Rao, et al., (2012), *“Optimization of Blank Holding Force in Deep Drawing of Cylindrical Cups using Taguchi Approach”*.
- G.Ingarao, et al., (2009), *“Analysis of stamping performances of dual phase: A multi-objective approach to reduce springback and thinning failure”*.
- Hosford, William F. and Caddel, Robert M., (2007), *“Metal forming mechanics and metallurgy third edition”*.
- Kováč, P. and Tittel, V., (2013), *“Blank Holder Force Optimization of Hemispherical Product Using Numerical Simulation”*.
- Leonid B. Shulkin, et al., (2000), *“Blank holder force (BHF) control in viscous pressure forming (VPF) of sheet metal”*.
- Shofiyanto, Mohamad Y., (2009), *“Simulasi proses Deep Drawing dengan pelat jenis Tailored Blank”*.